

УДК 621.793

# ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ВАЛ» ПУТЕМ КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МАТЕРИАЛ ПОКРЫТИЯ

канд. техн. наук, доц. В.А. ФРУЦКИЙ;  
канд. техн. наук, доц. Т.В. ВИГЕРИНА; В.В. КОСТРИЦКИЙ  
(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрены трибосопряжения, работающие при высоких скоростях скольжения и больших давлениях. Проанализированы причины высокой износостойкости рабочих поверхностей и материалов в таких условиях. Разработана технология комбинированного нанесения износостойкого композиционного материала. Показана возможность получения антифрикционного материала с необходимой структурой и свойствами, не уступающего по износостойкости базовым материалам; химический состав, структуру и свойства нанесенного на рабочую поверхность композиционного материала можно варьировать в широком диапазоне, подбирая оптимальные параметры для конкретных условий. Доказывается целесообразность использования в ремонтном производстве предприятий технологии получения композиционного материала с возможностью комбинированного воздействия при нанесении.

**Ключевые слова:** трибосопряжения, детали типа «вал», износостойкость, рабочая поверхность, восстановление, композиционный материал.

Основные предъявляемые к современному трибосопряжению технико-эксплуатационные требования – высокая точность геометрических параметров рабочих поверхностей, усталостная прочность и высокие показатели износостойкости.

В процессе эксплуатации автомобилей основная нагрузка приходится на детали и узлы, входящие в движительную группу автомобиля. Одним из высоконагруженных узлов двигателя внутреннего сгорания является пара «коренные и шатунные шейки коленчатого вала – вкладыши». Сегодня на предприятиях автомобильного транспорта наблюдается тенденция замены изношенного механизма новым, что приводит к повышенному расходу материальных и трудовых ресурсов и является экономически нецелесообразным, в то время как белорусские предприятия обладают мощной ремонтной базой, которая в последние годы мало востребована.

Повышение прочности сцепления и износостойкости восстановленных валов с сохранением их предела выносливости на уровне новых путем комбинированного воздействия на материал покрытия и является целью представляемой работы.

Проанализируем возможности восстановления сопряжений коленчатый вал – подшипник. В процессе эксплуатации коленчатых валов и при росте их износа наблюдается снижение сопротивления усталости на 25...30% [1], при этом степень износа коренных и шатунных шеек вала растет. Возникает вопрос их своевременного ремонта либо замены. Наиболее обоснованными способами восстановления коленчатых валов при износе и наличии трещин длиной не более 10...12 мм и глубиной до 3 мм, направленных вдоль оси вала, являются наплавка либо напыление шеек с последующей обработкой, которые позволяют получать высокую износостойкость, но при этом значительно снижается сопротивление усталости. Таким образом, получая требуемую износостойкость шеек при нанесении покрытий, необходимо сохранить усталостную прочность детали.

При исследованиях способов нанесения покрытия на подложку эффективность восстановления деталей трибосопряжения оценивают по формуле:

$$\frac{(C_{в.в.} + E \cdot K_{уд}) + (C_{в.п.} + E \cdot K_{уд})}{\frac{I_{пр.в.}}{i_{д.в.}}} \leq \frac{I_{н.в.} + I_{н.п.}}{\frac{I_{пр.н.}}{i_{д.н.}}},$$

где  $C_{в.в.}$ ,  $C_{в.п.}$  – себестоимость восстановления соответственно вала и подшипника;  $I_{н.в.}$ ,  $I_{н.п.}$  – цена соответственно нового вала и нового подшипника;  $E$  – нормативный коэффициент эффективности;  $K_{уд}$  – удельные капитальные вложения на восстановление;  $I_{пр.в.}$ ,  $I_{пр.н.}$  – предельно допустимый износ соответственно восстановленной и новой детали;  $i_{д.в.}$ ,  $i_{д.н.}$  – скорость изнашивания восстановленной и новой детали.

Анализируя методы нанесения покрытий с учетом критерия эффективности восстановления детали, выявлен наиболее продуктивный и наименее затратный метод – *плазменное напыление и наплавка*.

В качестве исходных материалов для восстановления использовали покрытия эвтектидного строения с избыточными карбидными и боридными фазами на основе стружечных отходов. Материал

покрытий должен обеспечить высокий уровень физико-механических и эксплуатационных свойств сопряжения, при этом стоимость детали в целом должна быть ниже вновь изготовленной, а введение легирующих элементов повысит антифрикционные свойства, способствуя тем самым повышению остаточных напряжений.

Основные технологические приемы нанесения и анализ работоспособности материалов на аустенитной и ферритной основе подробно приведены в работах [2; 3]. В качестве легирующих применяли элементы, способные изменить физические и эксплуатационные свойства получаемых материалов [4–6].

Основной путь регулирования количества и типа карбидов в износостойких или антифрикционных сплавах – выдерживание требуемого соотношения  $Cr/C$  в сплаве. В экономнолегированных износостойких сплавах необходимое количество, тип и морфология карбидных фаз формируются за счет рационального легирования более сильными карбидообразующими элементами, такими как ванадий, титан, вольфрам и молибден. В этом случае образуются преимущественно карбиды  $M_6C$  и  $M_3C$ , способствующие повышению эксплуатационных характеристик сплавов. При этом широко известным и эффективным приемом регулирования количества, морфологии и типа карбидной фазы в хромистых износостойких сплавах является термическая обработка. С увеличением количества хрома ухудшается свариваемость и повышается вероятность образования трещин в покрытиях.

При легировании бором материала образуются высокотвердые бориды  $Me_xB_y$ , которые способствуют резкому повышению твердости сплава. Высокая микротвердость боридов (12000...37000 МПа) и малая растворимость бора в металлах обеспечивают значительное повышение твердости сплава. Наряду с обеспечением твердости бор в составе эвтектических структур сильно охрупчивает сплавы. Особенно сильно это проявляется при совместном легировании бором и углеродом. Повышенная активность бора при его избытке выше предела растворимости приводит к образованию карбидов и боридов в наплавленном слое, то есть к упрочнению стали. Также он оказывает раскисляющее воздействие, а при его значительном количестве образуются трещины.

Большинство наплавочных сплавов содержит углерод. Широкое применение углерода обусловлено его малой стоимостью и высоким упрочняющим воздействием. При доэвтектическом содержании углерода ( $< 0,8\%$ ) формируется покрытие, обладающее высокой ударной прочностью при сравнительно высокой износостойкости. При большем содержании углерода и наличии карбидообразующих металлов существенно возрастает износостойкость, особенно абразивная, однако стойкость к ударным нагрузкам снижается. Углерод резко снижает коррозионную стойкость покрытий. Содержание углерода более 1,2% применяется редко. На технологические свойства сплавов углерод оказывает отрицательное воздействие – ухудшает свариваемость и увеличивает склонность к трещинообразованию.

Для повышения прочности материала и его антифрикционных свойств рекомендуют легирование композиционного материала медью. При этом приводятся различные значения содержания меди: от 0,5 до 30% для получения наилучших характеристик антифрикционных свойств. При таком легировании материалы способны работать при статических режимах с нагрузками, равными 280 МПа, однако величина « $p \cdot v$ » для этих материалов не превышает 2 МПа·м/с. Известно, что избыточное количество меди концентрируется во вторичной фазе, располагающейся в основном вдоль границ зерен. Сравнительный анализ влияния меди на структурообразование и свойства порошковых композиционных материалов свидетельствует о том, что в порошковых композиционных материалах не происходит полного расплавления меди, графитизирующее и упрочняющее ее влияние минимально, также не наблюдается аустенитно-стабилизирующий эффект. Следовательно, в данном случае речь может идти преимущественно о повышении антифрикционных свойств материала и его демпфирующих свойств в композиции.

Материал покрытий должен обеспечивать повышение усталостной прочности детали. Наличие легирующих элементов значительно повышает остаточные напряжения, а присутствие в покрытии карбидов является дополнительным источником для возникновения усталостных трещин. Наплавка порошковыми материалами с введенными легирующими элементами позволяет повысить твердость наплавленного покрытия до HRC 45...50 и получить гетерогенную структуру «матрица + твердые включения», оптимальную с точки зрения обеспечения износостойкости. При этом на всех этапах получения материала ведется его формирование за счет интенсивного механического воздействия. От этапа получения порошковой шихты (введение определенного количества легирующих элементов) до этапа получения материала (получение нужной для этих режимов работы структуры и распределение элементов в соответствии с проектом).

При нанесении материала в зонах, нагреваемых до температуры выше фазовых превращений, и при условии ускоренного охлаждения протекают следующие процессы:

- образование неравновесных структур, таких как пересыщенные углеродом и легирующими элементами твердые растворы;
- увеличение размеров зерна, которое оказывает неоднозначное влияние на эксплуатационные свойства валов, и, как следствие, возникновение внутренних остаточных напряжений.

Вышеперечисленные процессы в различной степени влияют на микроструктуру покрытия, а следовательно и на усталостную прочность детали в зависимости от материала покрытия. При этом неравновесные метастабильные структуры покрытий, с одной стороны, обеспечивают высокую твердость, а также прочность и износостойкость; с другой – увеличенные размеры зерна и внутренние остаточные растягивающие напряжения снижают сопротивление циклическим нагрузкам. Поэтому необходимо усилить процессы, которые стремятся свести это влияние к минимуму, обеспечив тем самым высокий уровень эксплуатационных свойств покрытия, в частности путем проведения следующих мероприятий [7; 8]:

1) введение в металл покрытия легирующих элементов, способствующих образованию высоко-температурных избыточных фаз типа твердого раствора, низкотемпературных эвтектик, первичных карбидов, боридов и др.;

2) введение в ванну при наплавке модификаторов тугоплавких металлов или соединений;

3) температурное воздействие с целью выравнивания внутренней структуры и нивелировки остаточных напряжений;

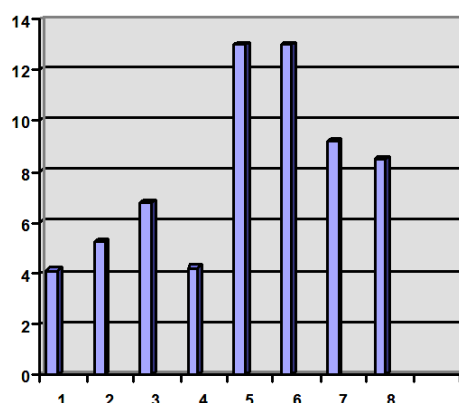
4) воздействие на ванну жидкого металла ультразвуковых или механических вибраций.

Решению первых трех проблем посвящены публикации [9; 10]. Подход к третьей проблеме решается в основном воздействием на температурное поле путем уменьшения градиента температур, что приводит к выравниванию внутренней структуры. Часть исследователей склонна уделять внимание измельчению структуры материала в момент кристаллизации за счет создания новых центров кристаллизации.

Представляется целесообразным приложить механические воздействия как во время первичной кристаллизации сварочной ванны, так и на этапе вторичной кристаллизации. При этом была выдвинута гипотеза о том, что длина волны воздействия должна укладываться в линейный объем сварочной ванны жидкого металла.

Для оценки влияния технологических факторов была исследована прочность сцепления (штифтовая проба)  $\sigma_{\text{сц}}$  покрытий (МПа) из вышеуказанных материалов. При этом варьировались сила тока  $I$  и дистанция напыления  $L$  (рис. 1).

$\sigma_{\text{сц}}$ , МПа



- 1 – Сталь 08X13 :  $I = 200$  А,  $L = 95$  мм; 2 – Сталь 08X13 + ЛЭ :  $I = 200$  А,  $L = 95$  мм;  
 3 – СЧ + ЛЭ :  $I = 200$  А,  $L = 95$  мм; 4 – ИЧХ + ЛЭ :  $I = 200$  А,  $L = 130$  мм;  
 5 – Сталь 08X13 + ЛЭ :  $I = 300$  А,  $L = 95$  мм; 6 – СЧ + ЛЭ :  $I = 300$  А,  $L = 95$  мм;  
 7 – Сталь 08X13 + ЛЭ + механическое воздействие :  $I = 200$  А,  $L = 95$  мм;  
 8 – СЧ + ЛЭ + механическое воздействие :  $I = 200$  А,  $L = 95$  мм

**Рисунок 1. – Прочность сцепления покрытий из исследуемых гетерогенных материалов при плазменном нанесении**

При отработке различных технологических приемов выявлено следующее:

- при наплавлении с оплавлением по обмозке – адгезия уменьшается (материалы 1 и 2). Вероятно, частицы обмозки под воздействием дутья горелки и кавитационных процессов перемещаются ближе к подложке, что и снижает сцепление нанесенных материалов;

- при наплавке порошковой смеси без оплавления – адгезия увеличивается, однако растет сегрегация наплавленного материала. Это в меньшей степени, но оказывает негативное влияние на прочность сцепления (материал 3 и 4);

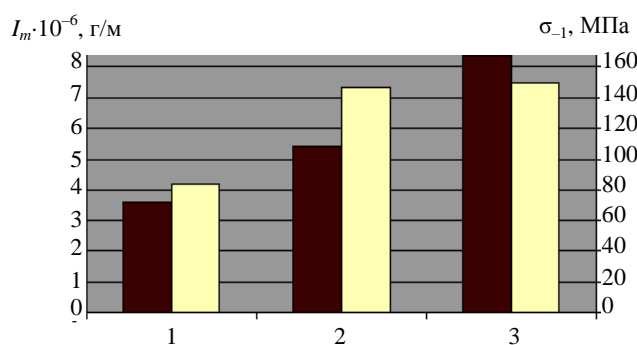
- при наплавке с уменьшением расстояния, но увеличением силы тока, а следовательно и температуры ванны – хорошая адгезия, незначительное выгорание легирующих элементов, сегрегация прак-

тически отсутствует. Очевидно, малое рассеивание материала и большой нагрев способствуют приближению покрытия к оптимуму (материалы 5 и 6);

- при механическом воздействии на жидкую фазу как в период твердения, так и сразу после кристаллизации наблюдается увеличение прочности сцепления, что объясняется более компактным распределением нерасплавившихся либо частично расплавившихся частиц и более полным их смачиванием жидкой фазой (материал 7 и 8).

Таким образом, максимальную прочность сцепления покрытия с подложкой обеспечивают сила тока  $I = 200$  А, расстояние до сопла горелки  $L = 95$  мм (материалы 5 и 6).

Сопоставительный анализ рассматриваемых материалов на износостойкость и усталостную прочность (рис. 2) показал, что образцы с покрытиями из стружечных отходов чугуна с добавлением легирующих элементов при высокой износостойкости имеют низкую усталостную прочность. Это можно объяснить наличием большого количества карбидных и боридных высокотвердых составляющих, равномерно распределенных по объему покрытия, вызывая тем самым большие остаточные напряжения и повышенную хрупкость.



1 – СЧ + ЛЭ; 2 – 08X13 + механическое воздействие; 3 – 08X13

Рисунок 2. – Интенсивность изнашивания  $I_m$  (темные столбцы) и предел выносливости  $\sigma_{-1}$  (светлые столбцы) наплавленных образцов

Применение механического воздействия на этапе кристаллизации материала связано с интенсивностью изнашивания, резко снижающейся при практически одинаковом пределе выносливости материала. Это можно объяснить следующим: при комбинировании наплавки и механического воздействия определяющими являются процессы, происходящие при кристаллизации расплавленного металла. Механические воздействия, осуществляемые в момент начала кристаллизации металла, создают: условия для протекания нелинейных эффектов в процессе кристаллизации; различные акустические потоки; точечное гравитационное воздействие; кавитационные процессы; силы вязкого трения. Комплексное воздействие приводит к изменениям структуры: уменьшению величины зерна; образованию равновесной структуры; повышению однородности наплавленного материала; уменьшению степени ликвации материала; более равномерному распределению неметаллических включений по всему объему наплавки. Характер образующейся структуры определяется такими факторами, как интенсивность перемешивания и коэффициент диффузии примесей в металле, скорость кристаллизации, градиент температур, степень переохлаждения и др. Изменяя эти параметры, наряду с изменением частоты механического воздействия можно получить желаемую равновесную структуру.

При этом в результате механического воздействия снижаются остаточные напряжения в зоне наплавки и формируется однородная мелкозернистая структура металла. Это объясняется появлением большого числа центров кристаллизации. Так, установлено, что при введении в материал хрома интенсивность изнашивания увеличивается в 4,63 раза, а предел выносливости – в 3,54 раза. Однако при механическом воздействии на материал в период твердения интенсивность изнашивания увеличивается в 3,02 раза (36,5%), а предел выносливости изменяется незначительно, увеличивается в 1,01 раза (1,4%).

#### Выводы:

1. При исследовании технологических параметров процесса плазменного формообразования установлены наилучшие режимы нанесения для достижения максимальной прочности сцепления, минимального износа и соотносительного предела выносливости изучаемых материалов. Так наилучшими с точки зрения прочности сцепления является дистанция 95 мм при силе тока 300 А. При этих же параметрах интенсивность изнашивания ниже, а предел выносливости выше у материалов, подвергавшихся механическому воздействию на этапе первичной и вторичной кристаллизации.

2. Экспериментально установлена возможность регулирования свойств нанесенного материала: количеством введенных легирующих элементов, технологическими режимами плазменного формообразования, механическим воздействием на покрытие в процессе кристаллизации. Так, установлено, что при механическом воздействии на жидкую фазу и при вторичной кристаллизации материала интенсивность изнашивания снижается на 36,5%, а предел выносливости – на 1,4%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вигерина, Т.В. Технологии восстановления коленчатых валов двигателей из высокопрочного чугуна и конструкционной стали напылением, наплавкой и поверхностным пластическим деформированием : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Т.В. Вигерина ; Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2013. – 25 с.
2. Камынин, В.В. Разработка и использование антифрикционных чугунов для тяжело нагруженных пар трения : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01 / В.В. Камынин ; Брянская инженерно-техническая акад. – Курск, 2000. – 19 с.
3. Восстановление деталей машин : справочник / Ф.И. Пантелеенко [и др.] ; под ред. В.П. Иванова. – М. : Машиностроение, 2003. – 672 с.
4. Морозов, С.В. Повышение износостойкости и долговечности литых деталей и инструмента за счет использования новых легированных Fe-C сплавов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / С.В. Морозов ; Брянская инженерно-техническая акад. – Брянск, 2003. – 15 с.
5. Пашечко, М.И. Разработка износостойких эвтектических покрытий большой толщины на основе системы Fe – Mn – C – B : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01 / М.И. Пашечко ; Физ.-мех. ин-т им. Г.В. Карпенко. – Львов, 1985. – 25 с.
6. Кутков, А.А. Износостойкие и антифрикционные покрытия / А.А. Кутков. – М. : Машиностроение, 1976. – 152 с.
7. Trofimov, A.I. The ultrasonic technique of increasing the strength characteristics of the welded joints of metal structures [Электронный ресурс] / A.I. Trofimov, S.I. Minin, M.A. Trofimov. – Режим доступа: [http://raen.info/files/3527/Pages%20from%20maket\\_2011\\_1\\_03-08.pdf](http://raen.info/files/3527/Pages%20from%20maket_2011_1_03-08.pdf).
8. Кузьмин, Ю.А. Электродуговая сварка в ультразвуковом поле [Электронный ресурс] / Ю.А. Кузьмин, В.В. Щавлев ; Ульяновский гос. техн. ун-т. – Режим доступа: [http://scjournal.ru/articles/issn\\_1993-5552\\_2008\\_7\\_37.pdf](http://scjournal.ru/articles/issn_1993-5552_2008_7_37.pdf).
9. Спиридонова, И.М. Структура и свойства железоборуглеродистых сплавов / И.М. Спиридонова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1984. – № 2. – С. 12–16.
10. Шве́ц, Т.М. Фазовый состав и структура высокодисперсных порошков железа и его композиций с платиной, серебром, золотом, медью и цинком / Т.М. Шве́ц, Н.О. Куцевская, А.Е. Пере́кос // Порошковая металлургия. – 2003. – № 1. – С. 28–35.

Поступила 01.02.2017

#### RESTORATION OF TYPE “SHAFT” PARTS BY THE COMBINED EFFECTS OF THE COATING MATERIAL

V. FRUCKI, T. VIGERINA, V. KOSTRITSKI

*The tribocoupling working at high speeds of sliding and big pressure are considered. The reasons of high wear resistance of working surfaces and materials in such conditions are analysed. The technology of the combined putting wearproof composite material is developed. The possibility of receipt of antifrictional material, with necessary structure and properties, not yielding on wear resistance to basic materials is shown. The chemical composition, structure and properties of the composite material applied on a working surface can be varied in a broad range, selecting optimum parameters for specific conditions. Feasibility of use in repair production of the entities of technology of receipt of composite material with a possibility of the combined impact when drawing is proved.*

**Keywords:** units, parts of type “shaft”, wear resistance, surface restoration, the composite material.